



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Székely László

**Elektrosztatikus porleválasztó
hatásosságának vizsgálata nagy porterhelés
esetén**

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Kiss István

Budapest, 2020

Tartalom

Összefoglaló.....	3
Abstract	4
Bevezetés.....	5
1. Elektrosztatikus porleválasztó.....	6
1.1 Száraz működésű porleválasztó felépítése.....	6
1.2 Nedves működésű porleválasztó felépítése.....	7
1.3 Leválasztás nehézsége.....	9
2 Matematikai modell	10
3 Ipari ESP paramétereit.....	13
4. Statikus és dinamikus modell vizsgálata, eredmények	15
4.1 Por ellenállásnak hatása	15
4.2 Tértöltés hatása.....	17
4.3 Leválasztás numerikus modellezése.....	19
5. Módosítási javaslatok.....	24
6. Konklúzió	26
Ábrajegyzék	27
Irodalomjegyzék	28

Összefoglaló

Elektrosztatikus porleválasztókat széles körben használnak ipari üzemekben, hogy jó leválasztási hatékonyságuk segítségével megfeleljenek a porkibocsátási korlátozások követelményeknek. A leválasztás azonban nagymértékben függ a részecskemérettől is. Általában a nagy szemcsék gyorsan leválnak, miközben a finom szemcsék tovább áramlanak a leválasztó térben. A mikro- és nanométeres tartományban lévők eredőben több töltést képesek felhalmozni, ami nagy porterhelés esetén intenzív korona-elnyomást eredményez.

Dolgozatom egy alacsony leválasztási fokú elektrosztatikus porleválasztó terepi tapasztalatain alapul, amely üzem esetében megváltozott a tüzelési technológia. Ennek eredményeképpen közel azonos pormennyiségben, de finomabb szemcsék kerülnek az ESP bemenetéhez. A por folyamatos és pontos nyomon követése érdekében numerikus modell segítségével különböző eseteket vizsgáltunk, kiegészítve különböző jelenségeket bemutató statikus modell-számításokkal. A működés javítása érdekében módosításokat javaslok.

Abstract

ESPs are widely used in industrial plants to fulfil the requirements of limitation of the dust emissions due to their good precipitation efficiency. However, this efficiency is depending a lot on the particle sizes. Usually the large particles get precipitated quickly while the fine particles continue to flow. The fine particles can absorb more charges specifically, causing corona quenching phenomenon in case of a high dust load.

My article was based on the field experience of an ESP with a reduced precipitation efficiency, in which the firing technology changed. As a result of that finer particles are getting at the entrance to the ESP. To accurately track the process, we examined different cases with a numerical model, supplemented by showing different phenomena with static model. I propose amendments to improve the environmental impact.

Bevezetés

A 18. század végétől új technológiák, új iparágak fejlődtek ki, felismerve a lehetőséget a feltöltött anyagok közötti taszítás és vonzás fizikájában. Beszélhetünk különböző festék- és porszórási eljárásokról (elektrosztatikus festék- és porszórás, fénymásolás) de akár nagyobb volumenű, leválasztási technológiába tartozó, a környezetünk tisztaságának megóvása érdekében telepített elektrosztatikus pernye-, csepp- és porleválasztókról. A légszennyezés a világon egyre több helyen válik meghatározó problémává, mert a gyors gazdasági fejlődéssel a környezetszennyező anyagok kibocsátása drámaian megnőtt, és az energiafogyasztás is növekvő tendenciát mutat. Nagy erőművek, és nagy környezeti terheléssel üzemelő ipari üzemek ma már el sem képzelhetők valamilyen kibocsátást szinten tartó vagy csökkentő technológia alkalmazása nélkül [1,2,3].

Elektrosztatikus porleválasztókat (ESP) gyakran alkalmaznak, elsősorban a nagy termelő országokban (Kína, Japán, USA), de megtalálhatók a világ számos pontjain, köztük Magyarországon is. A technológia sok előnyös tulajdonsággal rendelkezik, köztük a közel 100%-os porleválasztás. Azonban, a célérték elérése nagyon sok fizikai paramétertől függ, és gyakran felül kell vizsgálni egy-egy berendezést, hogy a megfelelő leválasztást biztosítja-e. A porleválasztó berendezésben létrejövő folyamatok igen komplexek, nyomon követésük bonyolult, több kutatócsoport is aktívan tevékenykedik a pontos modell megalkotása érdekében. A 2000-es évek elején a témában jártas BME kutatócsoport is megalkotott egy numerikus szimulációt, hogy az egyes folyamatokat nyomon követhessék [4,5].

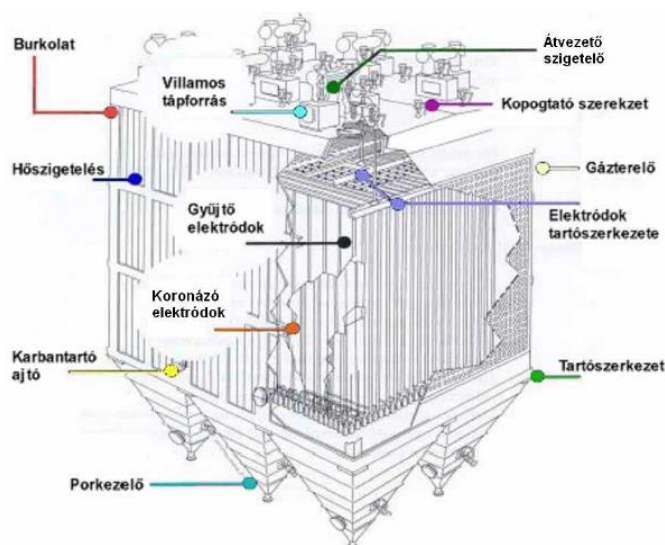
1. Elektrosztatikus porleválasztó

A porleválasztási technológia lehet száraz és nedves is. Az egyes berendezések témát érintő fő mutatószáma a leválasztási fok, amely lehet a teljes leválasztásra vonatkozó (összesített, por tömegre) vagy frakcióportalanítás (bizonyos méretű szemcsék kiválasztása). Az emberi légútra veszélyes frakciók a kis átmérőjű, néhány mikronos és kisebb tartományban levő szemcsék, így célszerű ezeket helyben összegyűjteni, szétterjedésüket és lerakódásukat meggátolni.

Nagy ipari üzemekben és erőművekben széles körben elterjedt az elektrosztatikus porleválasztók használata. Főbb előnyük a többi porleválasztási technológiával szemben, hogy széles hőmérséklet tartományban működnek (35°C - 800°C), nagy por-mennyiséget képesek kiszűrni (néhány 100 gm^{-3}), nagy áteresztő képességgel rendelkeznek ($1500\text{ m}^3\text{s}^{-1}$), széles szemcseméret tartományban képesek a port 99%-os hatásfokkal leválasztani. A pontos paraméterek értéke a fizikai berendezés előre megtervezett konstrukciójától függ.

1.1 Száraz működésű porleválasztó felépítése

Ezeknek a gigantikus ipari berendezéseknek a felépítése nem túl bonyolult. A porleválasztó kamrában földelt (ún. gyűjtőelektrodok) és nagyfeszültségű (korona vagy koronázó) elektródok találhatók, szigetelések, tartó- és kopogtató szerkezetek, valamint működtető elektronika. Egy elektrosztatikus porleválasztó berendezés felépítését az 1. ábra mutatja be.



1. ábra Elektrosztatikus porleválasztó egy típusának felépítése [6]

A por leválasztását a koronázó elektródból induló kisülések segítik, melyek a belépő levegőmolekulákat ionizálják, és ezek az ionok megtapadva a porszemcsék felületén, a villamos térerő következtében a gyűjtőelektród felé sodródnak. A megtapadó szemcsék elvesztik töltésüket, ezt követően vagy lezuhannak a gyűjtőelektródról a gravitáció miatt, vagy kopogtató szerkezet segítségével távolodik el az összetapadt porréteg.

A nagyfeszültségű koronázó elektródok általában kerettel vannak rögzítve felülről, amelyen átvezető szigetelőkkel vezetik át az elektródokat. A koronaelektródokat gerjesztő tápegység transzformátorból és nagyfeszültségű egyenirányítóból áll. Tapasztalati úton meghatározták, hogy negatív feszültségű táplálással nagyobb koronaáramot lehet elérni, emiatt (habár az ózon kibocsajtás nagyobb) ez a megoldás terjedt el a gyakorlatban. Az elektródok alakja különböző geometriájú lehet. Elterjedt a hengeres cső és rárögzített tuskés megoldás.

A berendezések típusától függően létezik egyfokozatú vagy többfokozatú. A több fokozat célja a jó leválasztási fok megvalósítása kevesebb olyan kisüléssel, amely nem vesz részt a portértöltés létrehozásában. Az ilyen típusú berendezéseknél az első zónában a por/pernye szemcsék feltöltése zajlik, további szakaszaiban a jelen lévő villamos tér segítségével a leválasztás.

1.2 Nedves működésű porleválasztó felépítése

Már a korai 1910-es években igény jelentkezett új típusú elektrosztatikus porleválasztókra, amikor felismerték a problémát, hogy a nagy ellenállású porok leválasztása kisebb mértékű vagy éppen, ha a leválasztandó anyag gázfázisú magas hőmérsékleten, ezért hűtésre szorul. Bizonyos típusú gázok abszorbeálására igény mutatkozott, hogy a szennyező anyagok egy része kondenzálódjon, mielőtt elérné a füstkivezető kéményt. Üzem közben tulajdonképpen csepplévasztás történik.

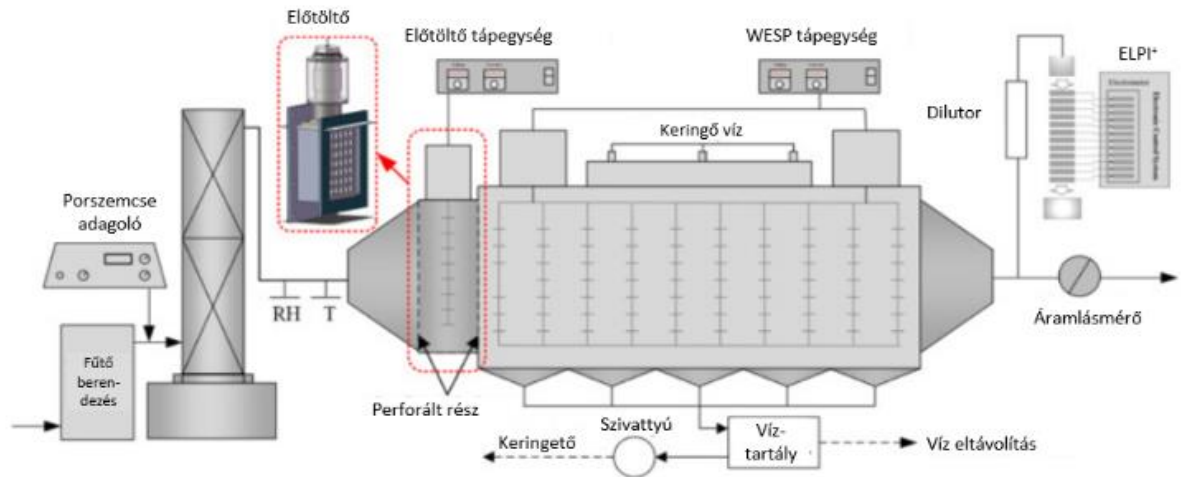
A probléma kompenzálására gyártották a nedves típusú elektrosztatikus porleválasztókat, először 1907-ben. További előnye, hogy képes a néhány mikronos és szubmikronos szemcsék nagy leválasztási fokkal való leválasztására [7]. A 2. ábra. szemlélteti felépítését.

Felépítésük nagyon hasonlít a száraz típusúéhoz, azonban fontos kiegészítő eleme folyadék vagy gőzvisszavezető cső, továbbá, hogy a kopogtatás helyett vízszugárral is eltávolíthatják a megtapadó port. Manapság viszonylag gyakran az alábbi helyeken alkalmazzák [8]:

- SO_3 gyűjtése széntüzelésű kazánoknál
- Ammónium-sók gyűjtése; ammónium-sűrítő berendezéssel együtt
- Kohászati és acél alkalmazásoknál

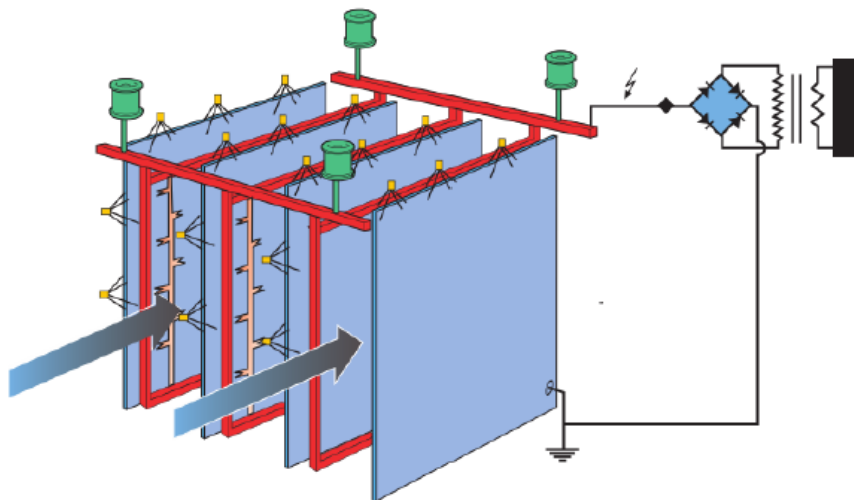
- Kátránygyűjtés
- Autóiparban, festékgyűjtőnek
- Üvegszálás iparban

Nem ritka, hogy az ipartelegen száraz és nedves porleválasztót egymás után alkalmazzák



2. ábra Nedves porleválasztó egy típusának felépítése [9]

Annak ellenére, hogy több mint 100 éves múltja van, kevésbé jól ismert technológia. Alapvetően 3 különböző megvalósítása létezik a porleválasztást illetően. Az első, hogy a gyűjtőelektród felületén folyamatosan áramló vízréteget folytatnak, így a por vagy szennyeződés a vízzel együtt leválik a gyűjtőelektródról. A második, hogy adott időközönként nagynyomású vízszugárral tisztítják meg az elektródok felületét. Végül a harmadik típusú megoldás, hogy kis- és közepes nyomáson állandó vízszugarat/permetet juttatnak a teljes leválasztó térbe. Az állandó vízpermet kibocsájtó alkalmazásnak az egyszerűsített szerkezetét mutatja be a 3. ábra.



3. ábra Vízpermet adagolásával megvalósított elektród elrendezés [8]

Tapasztalati úton rájöttek arra, hogy folyamatos gőz-hozzávezetéssel nagyobb villamos térerősség jöhet létre anélkül, hogy átütés következne be. Fontos szempont, hogy a porleválasztó berendezés a víz forráspontja felett üzemeljen (a bejuttatott víz se hűtse le túlzott mértékben), különben számolni kell az elektródok gyorsabb korróziójával, ami a gyakori kopogtatás hozzájárulásával hamar mechanikai problémákhoz vezethet. A karbantartási munkálatnak rendkívül nagy költsége van, valamint hosszadalmas és az ESP kulcsfontosságú szerepe miatt a gyár leállításához vezethet.

1.3 Leválasztás nehézsége

Ipari elektrosztatikus porleválasztók esetében a feszültség-áram karakterisztika elnyomása figyelhető meg normál üzem közben. Ha a tüzelési technológia megváltozik, a porszemcse mérete, villamos tulajdonsága is megváltozhat, aminek következtében a berendezés másképp reagál a leválasztást illetően. Az áthaladó szemcsék miatt az ESP átütési feszültsége megnő (még egy üres kamrához képest is). Általánosságban elmondható, hogy az átütési feszültséghez közeli tartományban legjobb a leválasztás. Ez azonban nem mindig van így.

A nagy szemcsék viszonylag hamar leválnak (a leválasztó tér első részében), míg a kis (kisebb mint $2,5\ \mu\text{m}$) szemcsék feltöltve tovább haladnak, létrehozva a por-tértöltést. Ez a tértöltés a koronaelektrodán egy villamos térerősség komponens eredményez, amely csökkenti a koronaáramot (az elektródán létrejövő koronakisülésekből adódó összarám). A feltöltött por turbulens áramlásban mozog, amelyet az elemzés során figyelembe kell venni. Hiába a megnövekedett (közel átütési) feszültség, a feltöltött por csökkenti a koronaáramokat. Tehát vannak olyan esetek, amikor nem lehet azt mondani, hogy a nagyobb feszültség jobb leválasztást okoz. Sőt, gyakorlati tapasztalat, hogy bizonyos esetekben az átlagfeszültség csökkentésével (impulzus üzem használatával) javul a leválasztás hatékonysága [10,11].

Az ESP kamrán belüli hatások és működési elméletük igen bonyolultak, a kutatások, modellezések a mai napig pontosítják a korábbi elméleteket. Az ESP villamos és elektrodinamikai folyamatainak megértéséhez célszerű numerikus modelleket alkalmazni, melyeknek az utóbbi évtizedben több megvalósítási formájuk is publikálásra került [12,13,14].

2 Matematikai modell

A leválasztás hatékonyságának meghatározásához numerikus modellt hozott létre a tanszéki témakörben jártas kutatócsoport [15]. A modell modulrendszerben készült, mely két fő részből állt. Az első kiszámítja a tápfeszültség és a tértöltés által okozott villamos teret, míg a második az áramlási teret és porszemcsék vándorlási pályáit.

A töltéssűrűség ismeretében az első modul az (1) egyenletnek megfelelően kiszámítja a félutca elrendezésének minden pontján a potenciált, vagyis meghatározza a potenciáeloszlást egy félutcában (egy utca elnevezést a porleválasztó kamra elejétől a végéig tartó, két gyűjtőelektród között levő tartományt értünk, de mivel szimmetrikus a koronaelektródok mentén, így elegendő az egyik felét vizsgálni; további számítások esetén tükrözni). Az egyenlet első tagja a tértöltés (ρV) hatását jelenti, a második kifejezés az A1 felületen elhelyezkedő felületi töltések hatását írja le (ρA), míg a harmadik a v dipólus momentumból származó potenciál értékét az A2 felületen (porleválasztók esetében ez elhanyagolható).

$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho V}{r} dV + \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{A_1} \frac{\rho A}{r} dA + \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{A_2} \frac{v}{r} \text{grad} \frac{1}{r} dA \quad (1)$$

Esetünkben (ρV) az ion és a szemcsék töltéssűrűségének összegét képviseli, (ρA) a korona és gyűjtőelektródon a felületi töltést. A feltöltött porszemcsék meghatározásakor a modell mind a tértöltést, mind a diffúziót figyelembe veszi. Szem előtt tartva, hogy a tértöltés a villamos teret befolyásolja, a villamos tér pedig a tértöltést, iterációs számításokra van szükség. Az egyenlőség megoldására iterációs numerikus modul lett készítve. A modul bemenetei a por mennyisége, a sebesség és koncentráció eloszlás egy adott pillanatban, az ESP kamra villamos és geometriai paraméterei. A kimenet a villamos tér következtében sodródó szemcsék elméleti vándorlási sebessége. Az utóbbi a (2) egyenlettel meghatározható.

$$Wth_y = \frac{Q_p^\infty E_y}{3\pi\mu d_p} Cu \quad (2)$$

ahol Q_p a d_p átmérőjű gömb alakú porszemcsének a telítési töltése a Cochet töltési egyenletnek megfelelően. Cu a Cunningham korrekciós faktor, μ a dinamikai viszkozitás, E_y a villamos térerősség y komponense (x és z irányú elhanyagolható [16]). A második modul meghatározza az áramlási teret, a por koncentrációjának eloszlását és a por szállását. A kutatás utolsó fázisában a 'c' koncentráció meghatározására figyelek, amely meghatározható a (3) transzportegyenlet megoldásával, figyelmen kívül hagyva a porfázis áramlási diffúzióját.

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{Sc_t} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (c \cdot Wth_y) \quad (3)$$

A (3) egyenlet v_x és v_y a gázáramlás sebességkomponensei, a kinematikai viszkozitás v_t , Sc_t a turbulens Schmidt szám és Wth_y az elméleti sodródási sebesség (2. egyenlet).

Donor cella módszerrel meghatározzuk az iontértöltést az ESP fél utcájában [17]. A hangsúlyt az ESP félutca azon területeire kell fektetnünk, ahol a változások relevánsak; ahol a fizikai értékek nem térnek el jelentősen, a számítások gyorsítása érdekében kikerülhet a fókuszról. A $div J = 0$ egyenlet a rács minden cellájára érvényes, így a cellába belépő töltések száma megegyezik a cellából kilépő töltések számával. A cella áramsűrűsége arányos a cellában lévő ionok mobilitásával (μ), a szomszédos cellák töltéssűrűségével (ρ_j), a szomszédos és az aktuális cella közötti potenciállal ($\varphi_j - \varphi_i$) és fordítva arányos a cellák (középpontjainak) távolságával ($\Delta_{j,i}$).

$$J_{j,i} = \rho_j \cdot \mu \cdot \frac{\varphi_j - \varphi_i}{\Delta_{j,i}} \quad (4)$$

A cellából kilépő töltések számításánál figyelembe veszik a cellák töltéssűrűségét.

$$J_{k,i} = \rho_j \cdot \mu \cdot \frac{\varphi_i - \varphi_k}{\Delta_{k,i}} \quad (5)$$

Ha a $div J = 0$ egyenletet kiegészítjük a töltéshordozók rekombinációjából származó töltésvesztéssel, akkor megkapjuk az alábbi egyenletet:

$$J_{j,i} \cdot L_{j,i} + J_{k,i} \cdot L_{k,i} + J_{l,i} \cdot L_{l,i} + R_i \cdot A_i = 0 \quad (6)$$

ahol R_i a töltéshordozók rekombinációs tényezőjét jelenti. A lineáris egyenletrendszer megoldása megadja az iontértöltést az ESP félutcájában. Az iontöltéssűrűségnek időbeli változásának követéséhez a donorcella áram egyensúlya helyett a szállított töltés egyensúlyát kell meghatározni [18]. Erre a célra egy dt idő léptéket vezetnek be, hogy a cellába beáramló és onnan kifolyó töltésmennyiséget meghatározzák. Ezzel az eljárással az iontértöltés változása a cella belsejében megfigyelhető az idő függvényében. Az időléptéket (dt) úgy kell megválasztani, hogy kisebb legyen, mint a töltés cellában lévő tartózkodási ideje, mely meghatározható a donorcella legrövidebb oldala (ds) elosztva az ionmobilitás (μ) és a villamos térerősség E szorzatával:

$$dt \ll \frac{ds}{\mu E} \quad (7)$$

A módszer megköveteli a számítási folyamat, valamint a modell adatszerkezetének folyamatos módosítását. Új adatkészletet kell hozzáadni a meglévő struktúrához, amely tárolja a kezdeti iontöltéssűrűséget [18]. Számítási metódus:

1. Villamos tér kiszámítása a kezdeti iontöltéssűrűséggel
2. Áramok kiszámítása donorcella módszerrel
3. Töltésátadás meghatározása a dt időintervallumban a kezdeti iontöltéssűrűség értékek felhasználásával
4. Áramló iontöltéssűrűség kiszámítása
5. Kezdeti iontöltéssűrűség cseréje az új értékkel és visszatérés az 1. lépésre

A modell képes figyelembe venni az ellenkorona jelenséget, impulzus üzemmódban is működhet és figyelembe veszi a turbulens határréteg áramlását.

3 Ipari ESP paramétere

Az elmúlt években volt lehetőség együttműködni elektrosztatikus porleválasztóval rendelkező céggel, ahonnan működési és geometriai paramétereket kaptunk. Habár maga a berendezés nem számít nagynak, a belépő porkoncentráció mégis nagy, $cc_{in} = 1910 \text{ mgN}^{-1}\text{m}^{-3}$. A térfogat (V_k) 151 m^3 , a keresztmetszet (A_k) $25,2 \text{ m}^2$, a kamra hossza (L_k) 6 m . Az ESP két kamrából állt, az utcák szélessége $0,3 \text{ m}$. A koronaelektródák egyenletesen helyezkednek el egymástól $0,5 \text{ m}$ -re. Hidrodinamikai paramétere: gáz áramlási sebessége $V_{in}=6.65 \text{ ms}^{-1}$ a bemenetnél, a bemenet keresztmetszete $A_{in}=2,48 \text{ m}^2$. A bejövő gáz sebessége lassabb az ESP kamra közepén, mint a belépési pontnál. A kamrán belüli gázsebességet a következő képlettel lehet közelíteni:

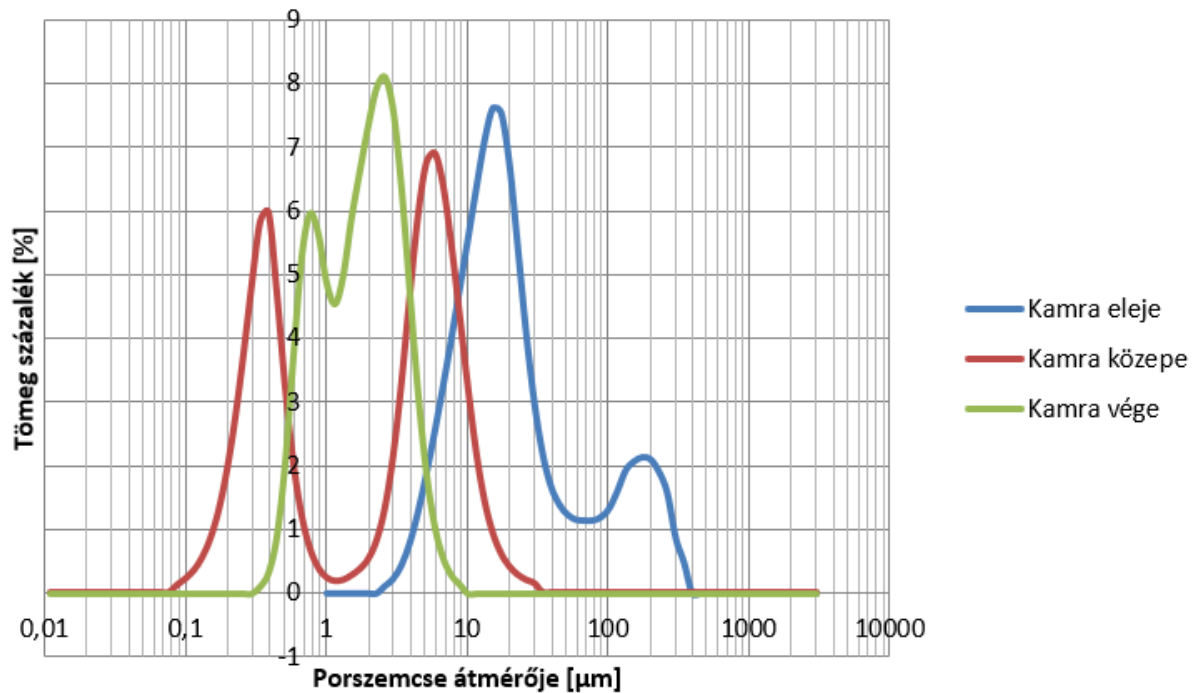
$$V_g = \frac{V_{in} \cdot A_{in}}{A_k} = \frac{6.75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2.48 \text{ m}^2}{25.2 \text{ m}^2} = 0.66 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (8)$$

A koronaelektródokon adott egyenfeszültségű tápot feltételezünk, így kiszámíthatjuk az iontértöltést és a koronaáramot. A gáz átlagos tranzit idejét az alábbi képlettel lehet számolni:

$$t = \frac{L_k}{V_g} = \frac{6 \text{ m}}{0.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 9.03 \text{ s} \quad (9)$$

Az egyenlet csak akkor lenne igaz, ha az áramlás tökéletesen egyenletes lenne. Ismert, hogy az ESP utcái között turbulencia van, az utcák közepén pedig a gáz gyorsabban áramlik. A számítás egyszerűsítése érdekében 5 -nek vesszük.

A vizsgált ESP esetén megváltozott a kazán tüzelési technológiája, és ezzel a szemcsék mérete és mennyisége is módosult. A bemeneti és kimenő por mennyiségét figyelemmel kísérjük. Az ESP két végpontja között meghatároztak néhány mintavételi helyet: a bemeneti kamra elülső, középső és hátsó részén, ahol megvizsgálták a leválasztott por összetételét is. Az eredmény az 4. ábra alapján látható:



4. ábra Leválasztott por összetétele

Az ábrán látható, hogy a nagy frakciók ($>100 \mu\text{m}$) azonnal leválnak, erre számítani lehetett. A kisebb szemcsék tovább repülnek, elérve a középső részt, ahol a $6 \mu\text{m}$ -es szemcsék nagyrésze válik le. A finom por már bejut a végső zónába, kirepül a kéményből. Fontos megjegyezni, hogy a fenti görbék az adott helyen lévő pormennyiség szemcseméret-eloszlását mutatják, tehát a kamra vége felé egyre csökken az össze pormennyiség.

A porszemcsék töltésekor két nagyon fontos paramétert kell megvizsgálni, a porszemcsék telítési töltését és a szemcsék felületén lévő töltések változását az idő függvényében, amíg a telítettségi töltést el nem éri. A legtöbb modell gömb alakú szemcsékkel számol, mely nem tökéletesen pontos, de egyszerűsége miatt széleskörben elterjedt. A poráramban felhalmozódó nagy tértöltés képes elnyomni a koronaáramot (corona-quenching). A Pautheiner-Moreau-Hanot összefüggés alapján a telítési töltés:

$$Qt = \frac{12 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot E \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (10)$$

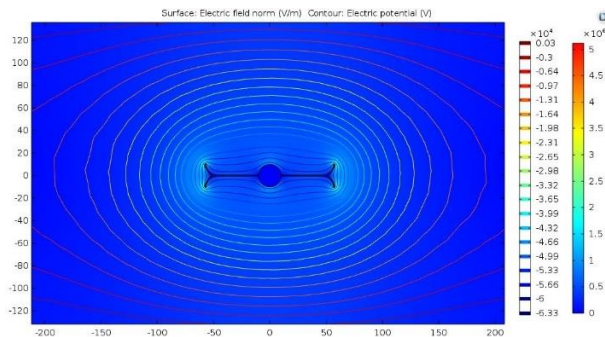
Az egyenletből észrevehető a relatív permittivitás fontossága, így az előző évi TDK dolgozatom a por tulajdonságok meghatározásán alapult. Többek között a relatív permittivitást is meghatároztam széles hőmérséklet tartományban. A 150°C -hoz tartozó érték 4 volt, melyet a numerikus modellbe be is építettem.

4. Statikus és dinamikus modell vizsgálata, eredmények

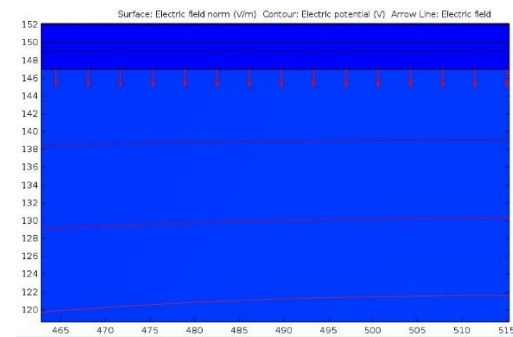
4.1 Por ellenállásnak hatása

A most következő vizsgálataim alapvetően a pornak két állapotát kíséri figyelemmel. Az egyik, ha a por megtapad az elektródokon és nem sikerül lekopogtatni, így megnövelve a porréteg vastagságát. Másik része a leválasztó térben áramló porszemcsék hatásának vizsgálata, mely nagy tértöltét tud létrehozni.

Vastag porréteg vagy nagyon nagy ellenállású porok esetén létrejöhet az úgynevezett ellenkorona-kisülés, mely a leválasztás hatékonysága és a poreltávolítás gyakorisága szempontjából döntő fontosságú. A nagy szigetelőképesség következtében a szemcsék által hozott töltések csak nehezen tudnak távozni a földelt gyűjtőelektród felé. A felhalmozódó töltések lokálisan akkor térerősséget képesek létrehozni, mellyel átütik a porréteget. Átütés után – a koronaelektrod feszültségével - ellentétes előjelű töltések kerülnek a leválasztó térbe, rontva ezzel a gyűjtőelektród és környezetének nagy, a leválasztást segítő villamos terét. Átütések előtt a felhalmozódó töltések lokálisan taszítják az érkező szemcséket, így kulcsfontosságú, hogy a porszemcsék hamar elveszítsék töltésüket. Ezt a taszító hatást mutatja be a 6. ábra.



5. ábra Térerősségeloszlás a koronaelektrod környezetében

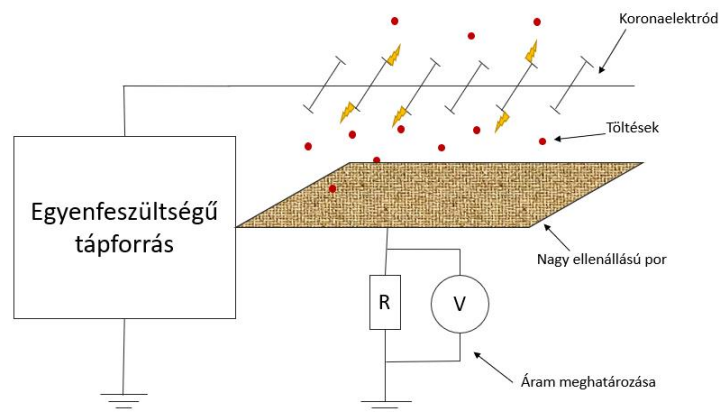


6. ábra Gyűjtőelektród felületén megjelenő taszító erő

Az egyes folyamatok szemléltetéséhez COMSOL-ban készített modellt készítettem. Az 5. ábra a koronaelektrod közelében kialakuló térerősségviszonyokat szemlélteti. A koronaelektrod feszültsége 65 kV, a legnagyobb térerősség $5,2 \text{ kVmm}^{-1}$ (mely az elektród felületén tapasztalható). Az elektródtól távolodva a térerősség gyűjtőelektród felé mutató komponense egyre gyengül, azonban látható a 6.ábrán, hogy a gyűjtőelektród közvetlen környezetében ellentétes hatást is gyakorol a felhalmozódott felületi töltés (piros nyíl jelzi a térerősség irányát).

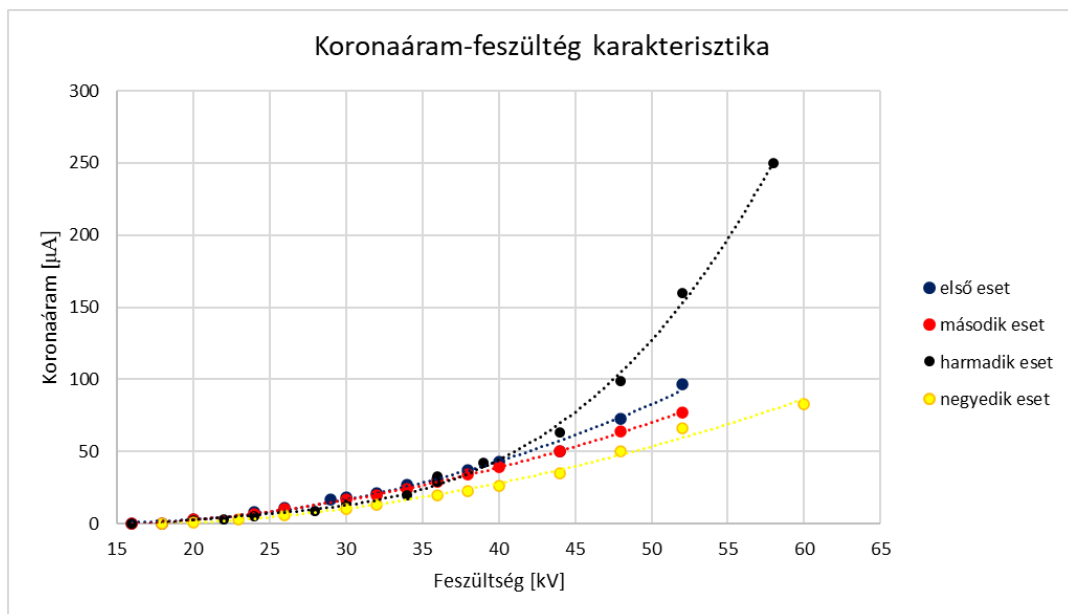
A porréteg makroszkópikus ellenállása meghatározható [19], leválasztás során a hatásait kell vizsgálnunk. A helyszíni mérés lenne a legkedvezőbb megoldás a hatás vizsgálatainak, komplikáltsága miatt azonban nehéz (üzem közben nem lehet kísérletezni vele), érdemes

laboratóriumi mérés során vizsgálni az egyes hatásokat. Elektrosztatikus porleválasztók jellemzőinek mérését általában a nagyfeszültségű koronaelektrodák és földelt gyűjtőelektrodák egy szakaszát tartalmazó vizsgálati elrendezés létrehozásával végzik. A koronaelektrod feszültségét szabályozni lehet, adott ellenállás két pólusán kialakuló feszültségkülönbségből következtetünk a koronaáramokra. A 7. ábra a mérési elrendezést illusztrálja.



7. ábra Mérési elrendezés a feszültség-áram karakterisztika meghatározásához

Az elektrod feszültségét nagy egyenfeszültségű tápforrás biztosítja. A gyűjtőelektrod 1 m*1 m-es fémlemez, a korona elektrodák iparban használt típusok egyike volt. A gyűjtőlemezt beborítva különböző ellenállású anyagokkal, a feszültség-áram (U-I) karakterisztika mérhető.



8. ábra Feszültség-áram karakterisztika különböző ellenállású por esetén

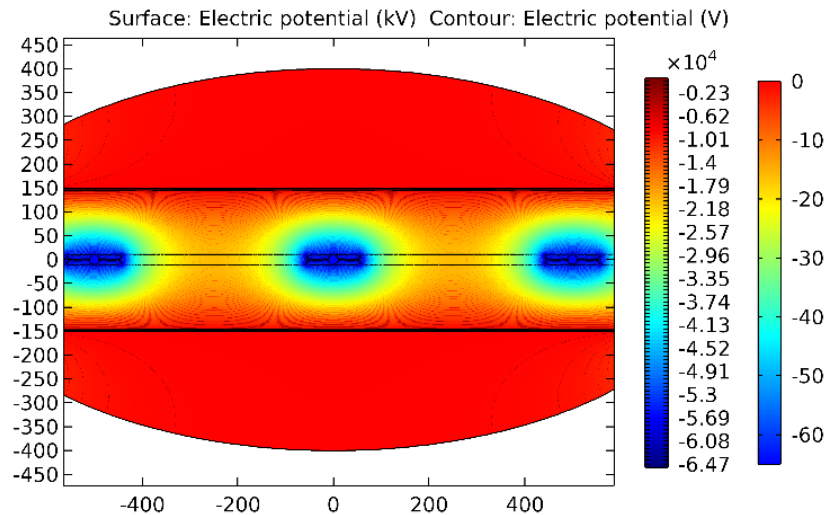
Az első esetben a gyűjtőelektród felszínére nem tettem semmit, „üres” ESP modell görbéje látható. Ez tekinthető referencia vagy kezdeti U-I görbéje. A második esetben egy kis fajlagos ellenállású (kevesebb mint $10^5 \Omega\text{m}$) porréteg van elhelyezve. U-I görbékben nincs jelentős változás a referencia méréshez képest, a töltések rövid ideig maradnak a felszínen. A helyzet változik, ha a porréteg fajlagos ellenállása nagyobb ($10^8 \Omega\text{m}$). A töltésfelhalmozódás jelentős, de a porréteg belsejében lévő villamos tér nem elég nagy ahhoz, hogy elindítsa az ellenkoronát. Ilyen esetekben megfigyelhető a koronaáram „elnyomása”. Ha a kisebb fajlagos ellenállású porréteg vastagsága megnő, hasonló eredményt produkálna, emiatt fontos az elektródák kopogtatása. Nagyon nagy fajlagos ellenállás mellett ($10^{11} \Omega\text{m}$ felett; 4.eset) a porréteg kicsiny vastagsága mellett is nagyon nagy töltés halmozódik fel, így a porrétegen belüli térerősség eléri azt az értéket, ami ellenkoronát hoz létre. Az U-I görbe eltér a kezdeti görbéhez képest. Fontos kiemelni, hogy az áram megugrása nem a leválasztás javulását fogja okozni, mert az ellentétes előjelű (leválasztást hátráltató) töltések áramlanak vissza [20].

A térerősség nagy gradiense miatt számolni kell a koronaelektrod felületére tapadó porral is (gradiens effektus). Ezáltal a koronaelektrod görbületi sugara megnő, a koronakisülés intenzitása csökken a villamos térerősség kisebb torzítása következtében.

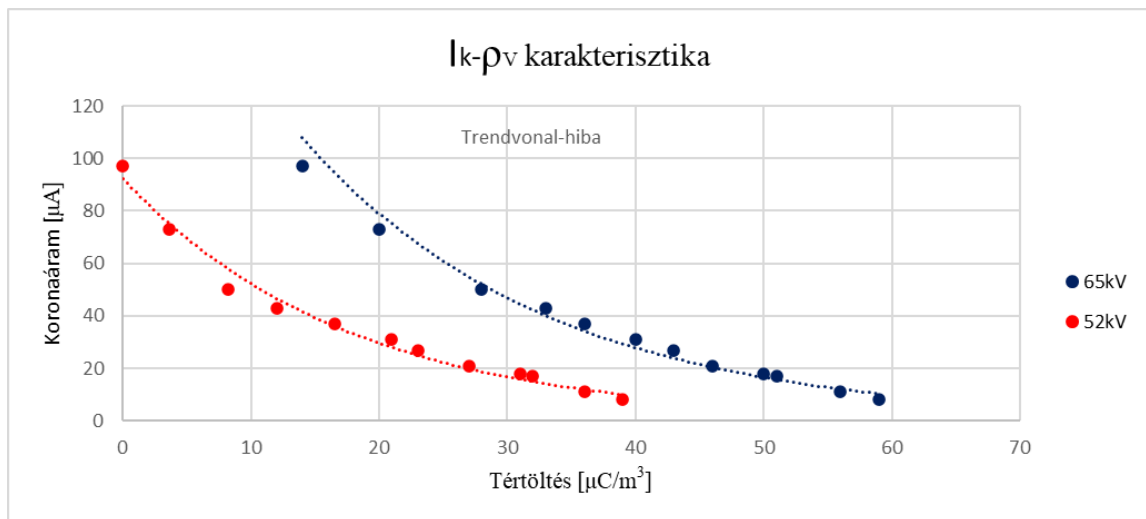
4.2 Tértöltés hatása

Az elektrosztatikus porleválasztóba beáramló porszemcsék az ionfelhőbe érkezve elkezdenek töltődni. A töltött por villamos erőteret hoz létre, corona-quenching (koronaáram-elnyomás) jelenség ennek köszönhető. A tértöltés miatt a porleválasztó berendezésekben megváltoznak az eredeti potenciálviszonyok, csökken a koronázó elektród felületi térerőssége, melynek következtében csökken a koronakisülések intenzitása is. A portértöltés előjele megegyezik a koronaelektrod feszültségének előjelével. Ez az állapot nagyban képes rontani a porleválasztás hatásosságát. A jelenséget ismerjük, azonban rendkívül nehéz modellezni laboratóriumi körülmények között, pontos mérése sem egyszerű. Gyakori eset, hogy a tértöltés értékére is áram-feszültség karakterisztikából próbálunk következtetni.

A COMSOL-ban készített modellben megtudunk adni tértöltéses tartományt, vizsgálataim során feszültséget és villamos térerősséget tudok meghatározni, a laboratóriumi mérések során beállított feszültség esetén, maximális villamos térerősség mellett áramot mérni. Így lényegében a két módszert összevetve képesek lehetünk koronaáramokat vizsgálni a tértöltés függvényében. Feszültségviszonyokat a 9. ábra, a következtetett koronaáram-tértöltés karakterisztikát a 10. ábra jeleníti meg.



9. ábra Feszültségviszonyok ESP egy tartományának „utcás” elrendezésében

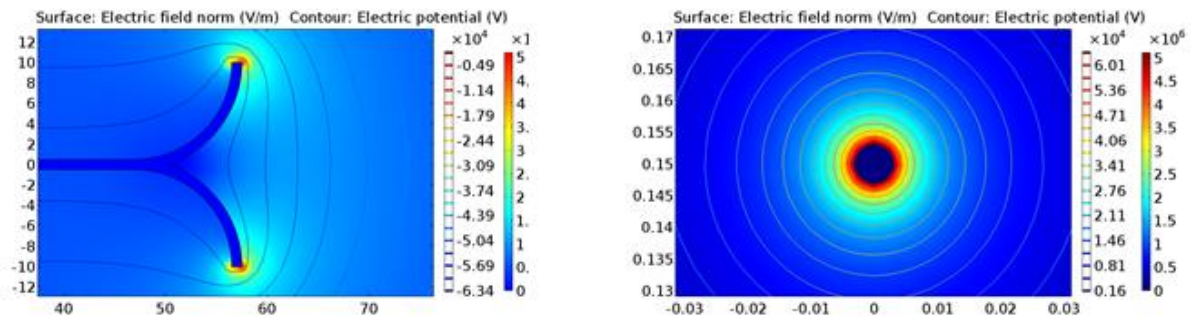


10. ábra Koronaáram-tértöltés karakterisztika

A laboratóriumi mérési elrendezés hasonló volt a 4.1 fejezetben bemutatott elrendezéshez. A különbség a nagy ellenállásréteg eltávolítása volt, valamint, hogy a koronázó elektródák fölé is elhelyeztünk egy ugyanolyan fémlemezt. A két lemezt galvanikusan összeköttöttük, így mindkét irányba távozó töltésekből kialakuló áramot tudjuk vizsgálni. A mérés-szimuláció során tisztán látható, hogy a tértöltésnek drasztikus hatása van a koronaáramokra, szélsőséges esetben meg is szüntetheti azt. Azonban fontos kiemelni, hogy a 30-40 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ -es tértöltés nagyon nagy mennyiségnek számít, a valóságban nem jöhet létre. A tértöltés erejének bemutatására alkalmas ezen vizsgálat, azonban a pontos eredményekhez, hidrodinamikai paraméterekkel kiegészült dinamikus szimulációk szükségesek.

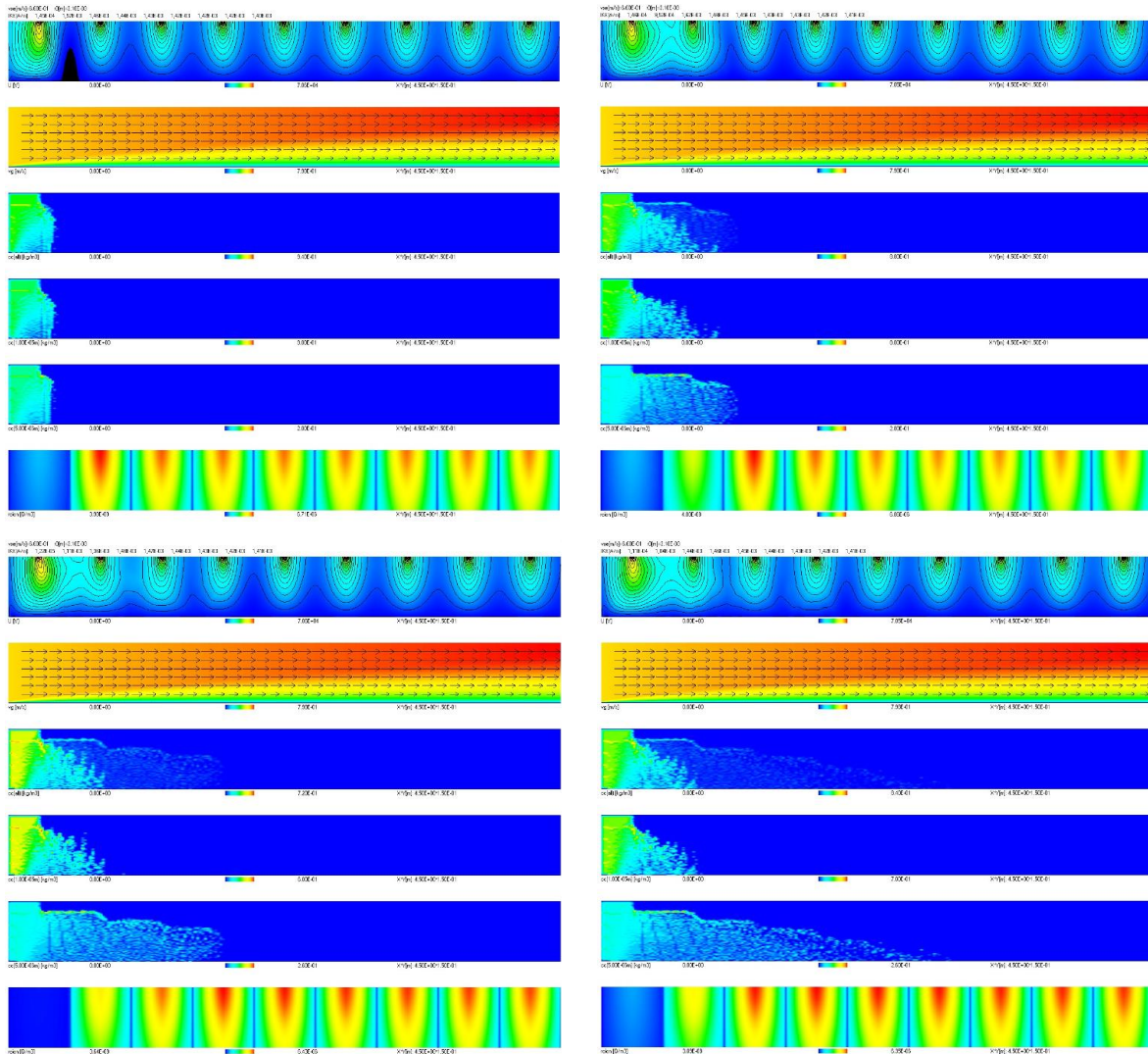
4.3 Leválasztás numerikus modellezése

A tanszéken kidolgozott korábbi numerikus modellnek más az elrendezése, mint az általam készített statikus modellnek, továbbá az elektród alakja is különbözik (statikus modell visszahajlított elektród, numerikus modellben kör alakú (huzallemez)). Ismeretes, hogy a legnagyobb villamos térerősség a koronaelektródok végén, tüskéin jön létre (legnagyobb töréspont a felszínen), ahol leginkább torzul az erőter. A statikus modellben a legnagyobb térerősség 5.089 kV mm^{-3} . A komplex modell hengeres típusú koronaelektródokkal számol, úgy változtattam az átmérőjét, hogy azonos legyen a statikus modellben tapasztalható legnagyobb térerősséggel. Ezáltal a tüskéket ekvivalens sugarú huzallal tudtam helyettesíteni. A huzalok átmérője az egyenértékű elektróda elrendezésben 3.1 mm , maximális térerősség összehasonlítását a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra Statikus és helyettesítő modell elektród felületén számított legnagyobb térerősség

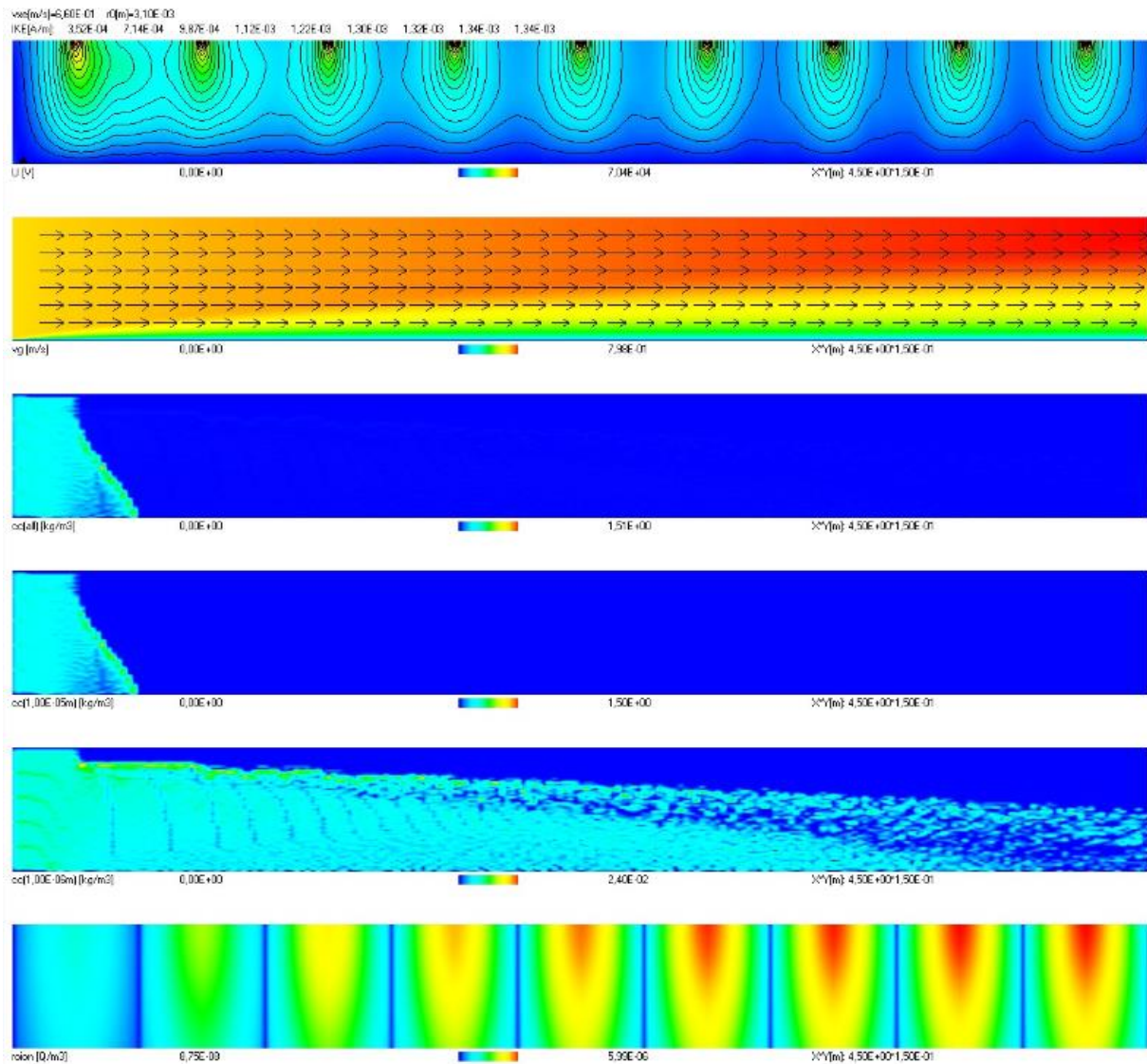
A numerikus szimuláció számítja a villamos téreloszlást, áramlás sebességét, frakció koncentráció eloszlásokat, az összes porkoncentrációt és a koronaáramokat. A dolgozatomban különböző porkoncentráció és frakciómérettel számolok. Közepes mennyiségű porral számolva az alábbi diagramokat kapjuk:



12. ábra Közepes mennyiségű por keresztülhaladása esetén modellezett leválasztás

A folyamatábrán nyomon követhető a porszemcsék vándorlása, a 3. sorban az eredő poráram, 4. sorban a 10 mikronos szemcsék, míg alatta az 5 mikronos. Látható, hogy a legtöbb szemcse leválik az 5.-6.elektrodáig bezárólag, tehát a leválasztás közel 100 %-os. A felső sorban a térerősség eloszlása változása látszik, a beáramló por felhalmozott töltései miatt, a nagy térerősség nem csak a koronaelektród felszínén volt tapasztalható. A szimuláció során nem történt átütés, azaz olyan mértékű térerő torzulás, ami megkövetelt volna egy-egy elektród impulzus üzemét.

A következő szimuláció során 3 frakciót vizsgálunk, 10 μm , 5 μm és 2.5 μm -es átmérővel. Az egyszerűség kedvéért 1 kgm^{-3} az első, tized annyi a második frakcióból, végül 0.02 kgm^{-3} a 2.5 μm -es átmérőjű porszemcsékből. A 13. ábra e paraméterekből összeállított szimulációs eredményt ábrázolja.

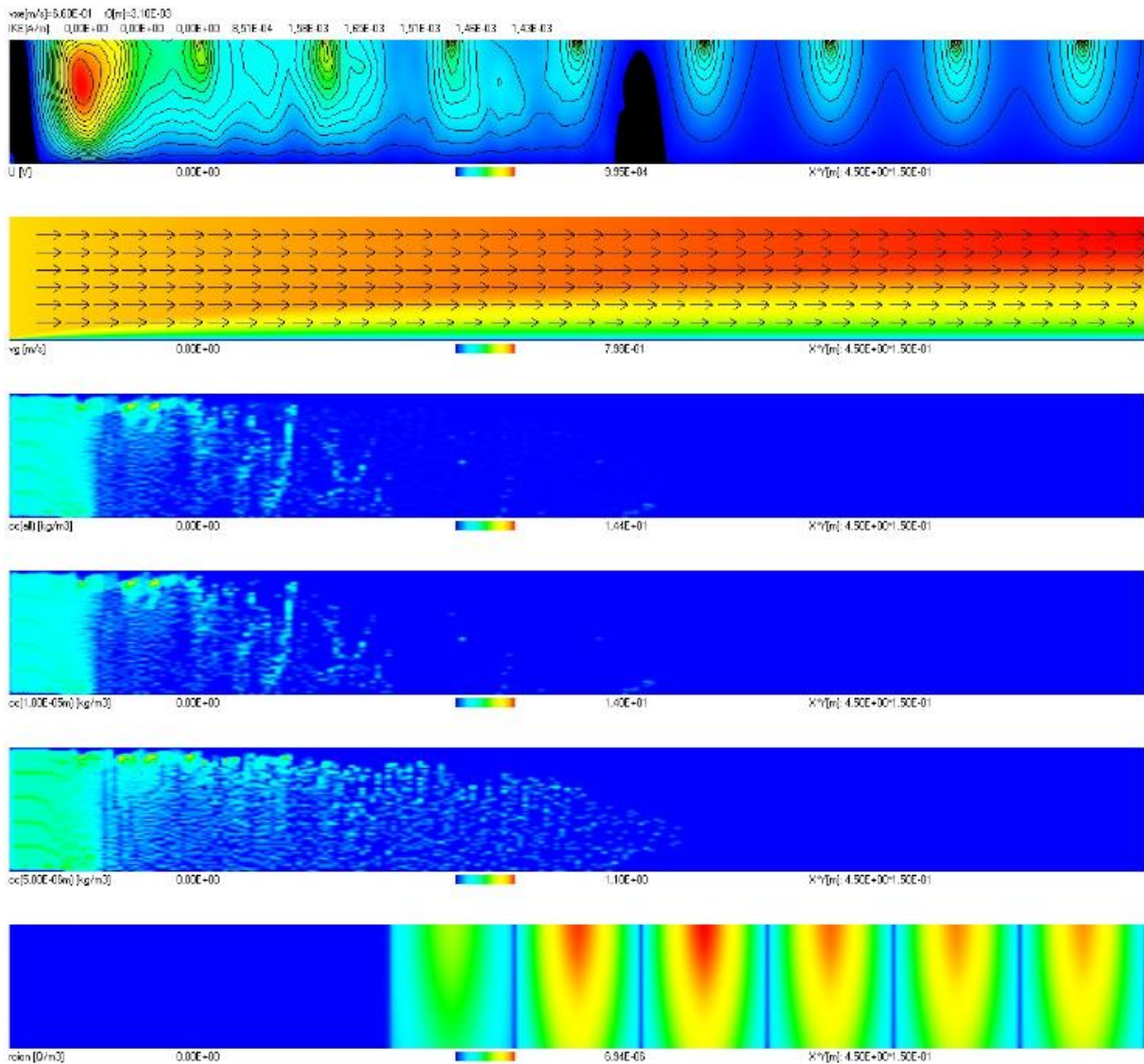


13. ábra Nagy pormennyiség esetén számított szimuláció

A kapott koncentrációeloszlásban a domináns komponens a legnagyobb átmérőjű, mivel a legnagyobb tömeget ezek a porszemcsék adják. Látható, hogy a nagy szemcsék gyorsan leválnak, miközben a finom, 2,5 μm -es szemcsék tovább áramlanak és töltést visznek magukkal. Az 5 μm -es szemcsék eljutnak a kamrák középső részébe, de a finomabb frakciók eljutnak a kamra végébe és elhagyják a porleválasztó kamrát. Sajnos ez a hatás gyakran figyelhető meg a meglévő ESP berendezések esetén, jelentős porkoncentráció mérhető a kimeneten.

Időről időre a koronakisülés a por töltése miatt megszűnik, ezáltal töltött porblokkokat létrehozva. Ezek a töltött blokkok repülnek át a kamrán, mivel nincs kisülés, így a koronaáram is visszaesik. A mért koronaáram a kamra elején jelentősen csökkent a kamra végén lévő mérésekhez képest. Corona-quenching jelenség figyelhető meg az első néhány elektródnál.

Tapasztalatok és szimulációk gyakran azt mutatták, hogy a por koncentrációjának csökkentésével nőtt a leválasztás hatékonysága. A következő vizsgálat során feltételezem, hogy csökken az eredő porkoncentráció. Ha a port csökkentjük és a granulometriai összetétel nem változik, a leválasztási fok nő. A most bemutatni kívánt esetben viszont visszavettük a nagy átmérőjű szemcsék darabszámát, miközben a finom szemcsék arányát megnöveltük. Számokban megadva, 0.9 kgm^{-3} 10 μm -es, 0.25 kgm^{-3} 5 μm -es és 0.025 kgm^{-3} 2,5 μm -es átmérőjű szemcséket állítottam be.



14. ábra Kisebb össztömegű, de nagyobb arányú 2.5 μm -es szemcsék esetén számított szimuláció

A szimulációból következően, annak ellenére, hogy a bejutó por mennyiségének értéke a finom szemcsék arányának növekedésével csökkent, a leválasztás nagyban romlott. A magyarázata, hogy a finom frakciók eredőben képesek voltak több töltést megkötni, így drasztikusan változtatva a villamos térerősség viszonyokat, mely meg is figyelhető a felső

sorban (az 5.-6.elektrod között a modell össze is omlott). A nagy térerő torzulás következtében az első 3 elektrodánál a koronakisülés teljesen eltűnt, a szimuláció további futása során a többinél is hasonló tapasztalható. A romló hatások ellenére a gyűjtőelektrod és koronaelektrod közvetlen környezetében a térerősség nagy, így elősegítve a lokális leválasztást (kevésbé jelentős), valamint emiatt tapasztalható a nagy porsűrűség is a koronaelektrod közelében. A nagy szemcsék most is hamar leválnak, a közepes méretűek tovább haladnak, végül a kis frakciók szinte leválasztás nélkül ki is áramlanak. Ezzel bizonyítva, hogy pusztán az össztömegét csökkentve a pornak, a leválasztás egyáltalán nem biztos, hogy javulni fog.

5. Módosítási javaslatok

A legkézenfekvőbb megoldás, ha pusztán a berendezés villamos paramétereit változtatjuk a leválasztás javítása érdekében, hiszen így magukban a technológiai lépésekben tudunk költséghatékonyan eljárni. Ha a por mennyiségét képesek vagyunk csökkenteni úgy, hogy a finom frakciók aránya nem nő meg, az további javulást okozhat. A táplálási mód változtatásával elérhető valamekkora javulás, impulzus üzem használatakor (egyharmadával csökkenthető a kimenő por mennyisége). Impulzus üzem esetén tudjuk szabályozni a feszültség kimaradás hosszát, a szünet utáni kezdő vagy indító feszültség értékét, valamint a felszabályozásnak az időtartamát, görbéjét. A változtatások során meghatározható az optimum szint.

Másik lehetőség, ha a por tulajdonságait változtatjuk meg. Ha az ipari technológia folyamatait nézzük, beiktatva néhány lépést a porleválasztás előtti fázisba, a por számunkra jelentős tulajdonságai változtathatók. Több előszűrő után más lesz a porösszetétel, hőmérsékletet – páratartalmat változtatva más lesz a pornak az ellenállása és relatív permittivitása is (melyet a tavalyi TDK dolgozatomban be is mutattam), valamint a porszemcsék összetapadása miatt a térfogatuk is jelentősen megnőhet. A szimulációkból következőleg a nagyobb térfogat előnyös lehet, hiszen még a porleválasztó kamra legelején kiválnak a por áradatból.

A vizsgált, szimulált porleválasztó berendezés száraz működésű volt. Gondolati szinten elkezdtem foglalkozni azzal, hogy mi történne, ha valamelyik berendezést nedves porleválasztói technológiává átalakítanánk át (emiatt volt kitekintésem a nedves működésű ESP bemutatására is). Számunkra a legjobb megoldás, ha a leválasztó térbe gőzt vezetnénk be, így növelve a kamrában lévő páratartalmat. Az előző bekezdésem alapján így a por ellenállása csökkenhet, összetapadásra hajlamosabb lehetnek a porszemcsék, valamint így a vízmolekulákkal ütközve hamarabb össze is állnának a szemcsék. További előnye a nagy páratartalmú kamrának, hogy az átütési feszültség megnő [21]. Ennek magyarázata, hogy az elektronok szabad úthossza csökken (kevésbé kiterjedt aktív zóna), így az elektron kevesebb energiát tud felvenni egy adott szakaszon. További változás, hogy az ionok átlagos szabad úthossza is megváltozik, mely esetben már az aktív zónán kívüli területet érdemes vizsgálni. A cél, hogy a por minél több ionnal (általában negatív oxigén) tudjon találkozni, ezáltal töltést szedni magára. E paraméter függ az kamra hőmérsékletétől, a levegő és ion molekuláris tömegétől és az ionmozgékonyaságtól is [22]. Fontos kiemelni, hogy a víz forráspontja felett kell üzemeljen a berendezés, még a víz hűtésű hatása után is, különben más folyamatok jönnek létre.

Forráspont alatt a páratartalom csekély növekedése mellett az elektródok gyorsabban öregednek, korróziós folyamatok alakulnak ki felszínén, és a gyakori kopogtatás hozzájárulásával hamar mechanikai problémák jelentkezhetnek. A karbantartási munkálatoknak rendkívül nagy költsége van, valamint hosszadalmas és az ESP kulcsfontosságú szerepe miatt a gyár leállításához vezethet.

6. Konklúzió

Néhány, statikus és dinamikus modellekkel számított eredményt mutattam be, kiegészítve néhány laboratóriumi méréssel. Egyszerűbb mérések, elemzések során elég lehet egy-egy laboratóriumi mérés, vagy éppen a statikus modellel való számítás, azonban a komplex elektro-és hidrodinamikai folyamatok nyomon követéséhez numerikus számítás a legkézenfekvőbb megoldás. Valós működési probléma esetén a porszemcsék eloszlásának és leválasztásának vizsgálata rendkívül fontos, mert beláttuk a kísérletek során, hogy pusztán a portömeg csökkentése nem feltétlenül hordoz javulást. Ha a finom frakciók mennyiségét megnöveltük, a leválasztás a mikron -és alatta levő tartománybeli porszemcsékre kevésbé volt sikeres. Ennek magyarázatát a tértöltésben és a kiváltott térerősség torzulásban kell keresni. Ha az eredeti mennyiséghez képest, a frakciók arányának megtartásával csökkentettük a portmennyiségét, úgy nőtt a leválasztás. Emiatt rendkívül fontos vizsgálni az össztömeg mellett a frakciókat leválasztását is.

Több megoldás is megfontolandó a leválasztási fok javításával kapcsolatban. A legjobb megoldás, ha magába technológia folyamatokba nem nyúlunk bele, mert így pénzt és időt is meg lehet spórolni, valamint fizikailag is legegyszerűbb módszer. A lehetőségek közül megemlítettem az impulzus üzem használatát, a portulajdonságok változtatását, valamint a gőz adagolását a leválasztási térben. A berendezés és benne zajló komplex folyamatok miatt nehéz kijelenteni, hogy egyik vagy másik módszer jobb, mint a többi. Bizonyos esetekben az impulzus üzem ad megoldást, más esetben kevésbé van hatása a leválasztásra. A megoldások során az ipari létesítményben szükséges kipróbálni a lehetőségeket és az alapján dönteni.

A numerikus modell száraz működésű ESP-re készült. Bizonyos beállítások során a peremfeltételek nem teljesülnek, többek között emiatt omlott össze az utolsó szimuláció során. Szem előtt tartva a páratartalom növelés hatását, a jövőben szeretném megvizsgálni az adott lehetőségeket, párhuzamosan a gyakorlati tapasztalatokkal, a numerikus modellt fejleszteni úgy, hogy használható legyen nedves elektrosztatikus porleválasztás nyomon követésére is. Ehhez még sok laboratóriumi, elmélet és gyakorlati kutatás szükséges.

Ábrajegyzék

1. ábra Elektrosztatikus porleválasztó egy típusának felépítése [6]	6
2. ábra Nedves porleválasztó egy típusának felépítése [9]	8
3. ábra Vízpermet adagolásával megvalósított elektród elrendezés [8].....	8
4. ábra Leválasztott por összetétele.....	14
5. ábra Térerősségeloszlás a koronaelektrod környezetében.....	15
6. ábra Gyűjtőelektrod felületén megjelenő taszító erő	15
7. ábra Mérési elrendezés a feszültség-áram karakterisztika meghatározásához.....	16
8. ábra Feszültség-áram karakterisztika különböző ellenállású por esetén	16
9. ábra Feszültségviszonyok ESP egy tartományának „utcás” elrendezésében.....	18
10. ábra Koronaáram-tértöltés karakterisztika	18
11. ábra Statikus és helyettesítő modell elektród felületén számított legnagyobb térerősség	19
12. ábra Közepes mennyiségű por keresztülhaladása esetén modellezett leválasztás	20
13. ábra Nagy pormennyiség esetén számított szimuláció.....	21
14. ábra Kisebb ösztömögű, de nagyobb arányú 2.5 µm-es szemcsék esetén számított szimuláció..	22

Irodalomjegyzék

1. X. Fu, S. Wang, B. Zhao, J. Xing, Z. Cheng: Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China, *Atmos. Environ.* 70 (2013) 39–50.
2. X. Sun, S. Cheng, J. Lang, Z. Ren, C. Sun: Development of emissions inventory and identification of sources for priority control in the middle reaches of Yangtze River Urban Agglomerations, *Sci. Total Environ.* 625 (2018) 155–167
3. Umberto Berardi: A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 123, 2017, Pages 230-241,
4. T. Iváncsy, I. Kiss, I. Berta: Numerical analysis of the effect of pulse energisation on back corona formation in electrostatic precipitators, *Proceedings of 15th International Symposium on High Voltage Engineering*, 2007, T1–740
5. T. Iváncsy, J. Suda, I. Kiss, I. Berta: Novel ESP model for impulse energisation, *Proceedings of the X. International Conference on Electrostatic Precipitation*, Cairns, Australia, 25–29 June 2006, 6B3
6. Balogh E: *Elektrosztatikus eredetű veszélyek kezelése, értékelése, Értekezés*, Budapest, 2004
7. Tzu-Ming Chen, Chuen-Jinn Tsai, Shaw-Yi Yan, Shou-Nan Li: An efficient wet electrostatic precipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles, *Separation and Purification Technology*, Volume 136, 2014, Pages 27-35, ISSN 1383-5866,
8. Porle K.: *ESP Design and Industrial Applications*, ICESPXIII, India, 2013
9. M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović, Ž. Nikitović, Š. Matejčik, M. Klas: The humidity effect on the breakdown voltage characteristics and the transport parameters of air, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 279, 2012, Pages 103-105,
10. Preben Lausen, Application of pulse energisation on electrostatic precipitators for various processes, *Journal of Electrostatics*, Volume 25, Issue 1, 1990, Pages 41-53, ISSN 0304-3886,
11. A. Zukeran et al., "Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1184-1191, Sept.-Oct. 1999.
12. Y. Kawada, H. Shimizu and A. Zukeran, "Numerical Study of the Suitable Precharger Grounded Electrode Length in Two-Stage-Type Electrostatic Precipitators," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 833-839, Jan.-Feb. 2019.
13. Zhuangbo Feng, Zhengwei Long, Shiqi Cao, Kazimierz Adamiak, Characterization of electrohydrodynamic (EHD) flow in electrostatic precipitators (ESP) by numerical simulation and quantitative vortex analysis, *Journal of Electrostatics*, Volume 91, 2018, Pages 70-80,
14. Z. Feng, Z. Long and K. Adamiak, "Numerical simulation of electrohydrodynamic flow and vortex analysis in electrostatic precipitators," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 2, pp. 404-412, April 2018.
15. I. Kiss, J. Suda, G. Kristóf, I. Berta: The turbulent transport process of charged dust particles in electrostatic precipitators, *7th International Conference on Electrostatic Precipitation*, Kyongju, Korea, 20–25 September 1998, pp. 196–205.
16. Suda J. M. Kétfázisú áramlás modellezése elektrosztatikus leválasztóban. PhD értekezés, BME, 2007.

17. A.M. Meroth, T. Gerber, C.D. Munz, A.J. Schwab: A model of the nonstationary charge flow in an electrostatic precipitator. Proceedings of VI International Conference on Electrostatic Precipitation, Budapest, Hungary, 1996, pp, 130-136
18. T. Iváncsy, I. Kiss, I. Berta: Improved model for the analysis of back corona in pulse energised electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, Volume 67, Issues 2–3, 2009, Pages 146-149,
19. Székely L., Kiss I.: Porok dielektromos jellemzőinek és nedvességfüggő paramétereinek vizsgálata elektrosztatikus porleválasztó leválasztási fok javítása érdekében, ENERGIAGAZDÁLKODÁS 61. évf. 2020. 1-2. szám
20. Kiss I., Székely L., Cselkó R., Berta I.,: Current-voltage Characteristic of Corona Discharge in a Needle Penetrating a Rogowski-Plate Arrangement, IAS Annual Meeting 2019
21. D. Rodriguez, R. S. Gorur and P. M. Hansen, "Effect of humidity on the breakdown characteristics of air in uniform field for the very low frequency (VLF) band," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 5, pp. 1397-1403, October 2009,
22. Ye Zhuang, Yong Jin Kim, Tai Gyu Lee, Pratim Biswas: Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, Volume 48, Issues 3–4, 2000, Pages 245-260.